

营养盐因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响

许忠能¹, 林小涛¹, 林继辉², 谢隆初¹, 黄长江³

(1. 暨南大学水生态科学研究所, 广州 510632; 2. 湛江海洋大学, 湛江 524025; 3. 汕头大学海洋生物室, 汕头 515063)

摘要:在实验室条件下,研究了营养盐因子对细基江蓠繁枝变种的氮、磷吸收速率的影响。分别进行了营养盐浓度与温度双因子试验、氮磷比与营养盐浓度双因子试验及不同化合态氮比例单因子试验。(1)氮、磷的吸收速率随营养盐浓度的升高而增大,氮的吸收速率在 21℃,总氮浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时最大,达 2.58 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$;磷的吸收速率在 31℃,总磷为 6.3 $\mu\text{mol/L}$ 时最大,达 0.17 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。温度与营养盐浓度有显著的交互作用效应。(2)当氮浓度一定时,环境氮磷比对氮的吸收速率无显著影响,但对磷的吸收速率有显著影响。藻吸收的氮磷比随环境氮磷比的不同而变化。(3)对 3 种不同化合态氮的吸收速率与培养液中各种氮占总无机氮的比例呈正相关,当三者比例相同时,对 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的吸收分别占总吸收氮的 40.7%、28.5% 和 30.8%。

关键词:细基江蓠繁枝变种;氮;磷;吸收速率

The Effects of Nutrient Availability on the Uptake of Nitrogen and Phosphorus by *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia

XU Zhong-Neng¹, LIN Xiao-Tao¹, LIN Ji-Hui², XIE Long-Chu¹, HUANG Chang-Jiang³

(1. Institute of Aquatic Ecoscience, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524025, China; 3. Marine Biological Laboratory, Shantou University, Shantou 515063, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 366~374.

Abstract: The effects of inorganic nitrogen(N)and phosphorus(P)concentrations, N : P ratio and different chemical forms of nitrogen on the uptake rate of N and P by *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia were studied under laboratory conditions to estimate N,P removing capacity by this red alga.

G. tenuistipitata var. *liui* Zhang et Xia was collected at Nanshan Island, southern China, and cultivated in the laboratory. Apical parts of the alga were used. Nutrients were added as NH_4SO_4 , NaNO_3 , NaNO_2 and KH_2PO_4 . 1 g samples were maintained in a beaker with 250 ml seawater of 20‰ salinity and pH8.0. The beakers were placed in an illuminating incubator. Light was provided with fluorescent tubes at a photosynthetically active photon flux density of 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Samples of the alga were acclimated to the experimental conditions for 4 hours, and new culture medium was renewed before the nutrient-uptake was measured. (1) Investigation of the effects of nutrient concentrations and temperature. The total N concentrations in the seawater for culture were adjusted to 1, 5, 10, 50 and 100 $\mu\text{mol/L}$, and N : P ratio was 16 : 1, and $\text{NH}_4^+ : \text{NO}_3^- : \text{NO}_2^-$ was 4 : 10 : 1. Temperature levels were set at 16, 21, 26 and 31℃. There were 20 concentration-temperature combinations, and duplicate cultures and a control were maintained for each combination. (2) Study on the effects of different N : P ratios and nitrogen concentrations. Total N concentrations were obtained at 1, 10 and 30 $\mu\text{mol/L}$ with N : P ratios 1, 15, 50, 100 and 150 in each N concen-

基金项目:国家自然科学基金“九五”重大资助项目(39790110);广东省环保局科研资助项目(98-187-21)

收稿日期:2000-12-01;修订日期:2001-05-14

作者简介:许忠能,男,硕士,助教。研究方向为水生生物及动物生理生态。

tration. Temperature was set at 20 C. (3) Study on different chemical forms of nitrogen. Samples were divided into seven groups according to $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+ : \text{NO}_2^-$ ratios 33 : 33 : 33, 63 : 31 : 6, 63 : 6 : 31, 31 : 63 : 6, 31 : 6 : 63, 6 : 63 : 31 and 6 : 31 : 63, respectively. Temperature, N, P concentrations and N : P ratio were 20 C, $10\mu\text{mol/L}$, $0.63\mu\text{mol/L}$ and 16 : 1, respectively.

(1) Both N concentration and temperature had significant effects on the rate of N uptake by the alga. The interactive effects between N concentrations and temperature were significant. At a constant temperature, uptake rate of N or P increased with increased nutrient concentrations. The highest N uptake rate of $2.58\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$ was obtained at 21 C with the nitrogen concentration of $100\mu\text{mol/L}$. On the other hand, the N uptake rates at 21 C and 26 C were higher than those at 16 C or 31 C when N concentration was higher than $10\mu\text{mol/L}$. Temperature did not influence on N uptake rate when nitrogen concentration was less than $10\mu\text{mol/L}$. With increased P concentrations P uptake rate increased significantly and was not affected by temperature changes. The interactive effects were significant ($P < 0.05$) between P concentrations and temperature levels. P uptake rate reached as high as $0.17\mu\text{mol}/(\text{g FW} \cdot \text{h})$ at 31 C with the phosphorus concentration of $6.3\mu\text{mol/L}$. At low P concentrations, temperature insignificantly influenced the P uptake rates. But at the concentration of $6.3\mu\text{mol/L}$, the uptake rate increased with increased temperature. (2) At fixed N : P ratios, elevation of N concentration increased N uptake. N uptake rates were $0.081 \sim 0.113\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ with the N concentration of $5\mu\text{mol/L}$, and $0.346 \sim 0.429\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ with the N concentration of $30\mu\text{mol/L}$. N : P ratios did not result in any significant difference in the N uptake rate of *G. tenuistipitata* var. *liui*. There was no significant interaction among N : P ratios and N concentrations. Both N : P ratios and nitrogen concentrations had significant effects on P uptake rates, and there was significant interaction among N : P ratios and N concentrations. When N : P ratios were raised, P uptake appeared to decline. However, at N concentration of $30\mu\text{mol/L}$, P uptake rate was higher with N : P ratio of 15 : 1 compared to that of 1 : 1. At a constant N : P ratio, higher N concentration brought about higher P uptake. When N concentration was $5\mu\text{mol/L}$ or $10\mu\text{mol/L}$, P uptake rates with N : P ratios of 100 : 1 or 150 : 1 were negative. The values of N : P ratios of nutrients that were absorbed were proportionally related to the N : P ratios in medium. At $30\mu\text{mol/L}$ of N, the absorbed N : P ratio was 6.5 : 1 with the ambient N : P ratio of 1 : 1, and it rose to 49.7 : 1 with that of 150 : 1. (3) In the study of chemical forms of nitrogen, the N and P uptake rates in cultures, NH_4^+ of which was 63% of the total N, were higher than the ones with lower NH_4^+ levels. The uptake rate of any form of N was proportional to its existing amount. The uptakes of NH_4^+ -N, NO_3^- -N or NO_2^- -N were 40.7%, 28.5% and 30.8% of the total N uptake, respectively, when they were set at same levels.

N and P-removing capability by *G. tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia, within the range tested, depended on the concentrations of inorganic N and P, their ratios and temperature. The alga could absorb NH_4^+ , NO_3^- or NO_2^- as the source of nitrogen, and appeared to prefer to NH_4^+ than other two forms of N when they existed in equal in concentrations. *G. tenuistipitata* is of potentials to remove inorganic nitrogen and phosphorus from seawater. Nutrient levels in seawater should be taken into account wherever the alga is to be employed.

Key words: *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia; nitrogen; phosphorus; uptake rate

文章编号: 1000-0933(2002)03-0366-09 中图分类号: Q958.8 文献标识码: A

氮、磷含量升高是水体富营养化的重要特征,某一化合态的氮,如 NH_4^+ -N(NH_3 -N)、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 等在环境中浓度升高或剧烈变化也显示出水生态环境受损^[1]。防治水体富营养化的根本措施在于控制、减少水体氮、磷等营养物质的负荷^[2]。但由于天然海水中营养盐元素的化合价具有多态性,因而造

成了水体富营养化形式与过程的多样化。另一方面,由于营养物质的来源复杂,且营养盐因子还受到季节变换、生物作用及温度盐度等理化因子影响而在一定的时空范围内表现出动态分布特征^[3],这无疑增加了海水富营养化治理的难度。放养大型海藻是限制营养盐水平的一条有效途径,为降低治理成本及易于推广应用,目前迫切需要寻找一种环境适应能力强、经济价值较高、吸收营养盐能力较强的藻种。

细基江蓠繁枝变种 *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia 是琼脂工业的重要原料,也是水产养殖的优质新鲜饵料,已有学者对其养殖条件、养殖方式和藻体成分等进行过研究^[4,5]。但营养盐因子对细基江蓠繁枝变种治理水体富营养化效果的影响尚未见报道。本文以多个富营养化海区的实际情况为依据设置实验条件,研究不同营养条件下该藻的营养盐吸收速率,以期为吸收利用水中氮、磷,改善近海环境质量探索一条生物途径。

1 材料与方法

1.1 实验材料

细基江蓠繁枝变种(以下简称江蓠)采自湛江三岛养虾池,经分离纯化后在实验室培养。培养温度为 20 ± 0.5 °C,盐度为 20‰,照度为 $800 \pm 48 \mu\text{mol photon}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期为 12L : 12D。每次实验均选取生长正常的江蓠,取同一部位的藻体作试验材料。测量江蓠鲜重时,要将江蓠藻体表面的水分吸干,吸水用的滤纸先经蒸馏水浸洗过以除去 NO_2^- 、 NO_3^- 等,再烘干使用。

海水取自南海大亚湾大辣甲岛离岸开阔处,水深约 15m。海水的盐度为 32.5‰,pH7.73, NH_4^+ -N 为 $0.07 \mu\text{mol}/\text{L}$, NO_3^- -N 为 $0.86 \mu\text{mol}/\text{L}$, NO_2^- -N 为 $0.07 \mu\text{mol}/\text{L}$, PO_4^{3-} -P 为 $0.03 \mu\text{mol}/\text{L}$ 。有关指标按实验要求调整,用 NaOH 和 HCl 调节海水 pH 值,用蒸馏水调节海水盐度,用 NH_4SO_4 、 NaNO_3 、 NaNO_2 、 KH_2PO_4 调配营养盐浓度。

实验前一天,将各培养条件逐渐调节至实验设定值。

1.2 氮、磷吸收速率的测定方法

实验用 250ml 烧杯,内装 250ml 培养液,培养液盐度 20‰,pH 值为 8.0。每个培养烧杯投江蓠 1g(鲜重),加盖培养皿。对照组不放江蓠。实验烧杯置于光照培养箱中,光强为 $800 \mu\text{mol photon}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。实验前,将江蓠置于设定的条件下适应 4h 后更换新鲜培养液,然后开始实验。实验时间为 4h。实验结束后测定水样中氮、磷含量^[6],按下式^[7]计算吸收速率:

$$V = (N_o - N_t)S/tG$$

式中, V 为吸收速率, N_o 为实验结束时对照组培养液营养盐含量, N_t 为实验结束时培养组培养液中的营养盐含量, S 为培养液体积, t 为实验时间, G 为江蓠生物量。

1.3 实验项目

1.3.1 不同氮、磷浓度和温度下江蓠对氮、磷的吸收速率 培养液总无机氮浓度设 1、5、10、50、100 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 等 5 个梯度(各梯度 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 的比例为 4 : 10 : 1),氮磷比值均为 16,相对应的磷浓度为 0.063、0.31、0.63、3.1、6.3 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。温度设 16、21、26、31 °C 4 个梯度,共 20 个氮浓度-温度组合。每组设 2 个重复和 1 个空白对照。

1.3.2 不同氮磷比和不同氮浓度下江蓠对氮、磷的吸收速率 总无机氮浓度设 5、10、30 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 3 个梯度,每个氮浓度下氮磷比值设 1、15、50、100、150 等 5 个梯度,共 15 个实验组合。每组设 2 个重复和 1 个空白对照。温度为 20 °C。

1.3.3 不同化合态氮比例下江蓠对氮、磷的吸收速率 按总无机氮中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 所占比例不同分 7 个实验组,各组 3 种氮的比例(NO_3^- -N : NH_4^+ -N : NO_2^- -N), (A) 33 : 33 : 33; (B) 63 : 31 : 6; (C) 63 : 6 : 31; (D) 31 : 63 : 6; (E) 31 : 6 : 63; (F) 6 : 63 : 31; (G) 6 : 31 : 63。每组设 3 个重复和 1 个空白对照。温度为 20 °C,总无机氮浓度(TN)为 10 $\mu\text{mol}/\text{L}$,无机磷(PO_4^{3-} -P)浓度为 0.63 $\mu\text{mol}/\text{L}$,氮磷比值为 16。

1.4 数理统计方法

对氮浓度-温度、氮磷比-氮浓度的实验结果采用两因素方差分析,对不同化合态氮比例的结果采

用单因素方差分析。

2 结果

2.1 不同氮、磷浓度和温度下江蕨对氮、磷的吸收速率

根据方差分析,氮浓度和温度条件对江蕨吸收氮的速率都有极显著的影响(P<0.01),且两者之间交互作用极显著(P<0.01)。在不同温度条件下,江蕨对氮的吸收速率均随氮浓度的升高而增大;在本实验设定的16~31℃温度范围内,N浓度50μmol/L时,吸收速率为0.52~1.21μmol/(g·h),在本实验设定的最大浓度值100μmol/L条件下,吸收速率达1.50~2.58μmol/(g·h)(图1)。另一方面,当氮浓度在10μmol/L以下时,温度对藻体吸收N的影响不明显,而氮浓度达到10μmol/L以上时,温度21℃、26℃组有更高的吸收速率(表1)。吸收速率与温度、氮浓度的复回归关系为:

y = -1.544092 + 0.13552x1 + 0.0163x2 - 0.0028x1^2 + 0.0001x1x2
(n = 20, R = 0.96, P < 0.01)

式中,y为江蕨对N的吸收速率(μmol/(g·h)),x1为温度(℃),x2为氮浓度(μmol/L)。方差分析见表2。

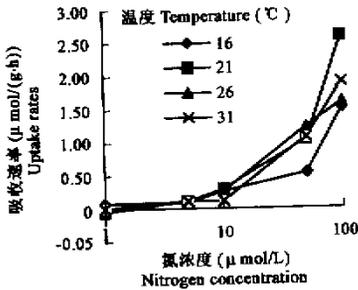


图1 不同温度下细基江蕨繁枝变种对氮的吸收速率随总无机氮浓度的变化

Fig. 1 The effects of temperature on N uptake rates of Gracilaria tenuistipitata var. liui under different nitrogen concentration

表1 不同总无机氮浓度下细基江蕨繁枝变种对氮吸收速率随温度的变化

Table 1 The effects of nitrogen concentration on N uptake rates of Gracilaria tenuistipitata var. liui under different temperature

Table with 6 columns: Total inorganic nitrogen concentration (μmol/L), Temperature (°C), and mean uptake rate and standard deviation for each combination.

① mean ② standard deviation

表2 不同总无机氮浓度、温度下细基江蕨繁枝变种对氮吸收速率方差分析

Table 2 Analysis of variance between N uptake rates of Gracilaria tenuistipitata var. liui under different nitrogen concentration and different temperature

Variance analysis table with columns: Source of error, Degree of freedom, Sum of squared deviations, Mean square, F value, P.

①temperature ② nitrogen concentration ③temperature × nitrogen concentration ④residual ⑤sum

磷浓度对江蕨吸收磷的速率有极显著的影响(P<0.01),但温度对江蕨吸收磷的速率的影响不明显(P>0.05),两者之间有显著交互作用(P<0.05)。在各温度下,磷浓度3.1μmol/L时,江蕨对磷的吸收速率为0.044~0.060μmol/(g·h),当磷浓度为本实验设定最大值6.3μmol/L时,江蕨对磷的吸收速率达0.11~0.17μmol/(g·h)(图2)。在磷浓度较低条件下,温度对江蕨吸收磷的影响不明显,但当磷浓度达到6.3μmol/L时,吸收速率有随温度升高而增大的趋势(表3)。吸收速率与温度、磷浓度的复回归关系为:

y = 0.00636 + 3.4375 × 10^-5 x2 + 1.875 × 10^-6 x1 x2
(n = 20, R = 0.96, P < 0.01)

式中,y为江蕨对P的吸收速率(μmol/(g·h)),x1

为温度 (C), x_2 为磷浓度 ($\mu\text{mol/L}$)。方差分析见表 4。

表 3 不同磷浓度下细基江蕨繁枝变种对磷吸收速率随温度的变化

Table 3 The effects of phosphorus concentration on P uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different temperature

磷浓度 ($\mu\text{mol/L}$) Phosphorus concentration		温度 Temperature (C)			
		16	21	26	31
0.063	均值 ^①	0.007	-0.009	0.000	0.008
	标准差 ^②	0.0031	0.0129	0.0012	0.0013
0.31	均值	0.013	0.025	0.038	0.003
	标准差	0.0035	0.0001	0.0105	0.0044
0.63	均值	0.028	0.033	0.033	0.019
	标准差	0.0025	0.0064	0.0010	0.0013
3.1	均值	0.044	0.055	0.060	0.052
	标准差	0.0052	0.0171	0.0156	0.0051
6.3	均值	0.107	0.142	0.147	0.166
	标准差	0.0280	0.0136	0.0211	0.0289

① mean ② standard deviation

2.2 不同氮磷比值及氮浓度下江蕨对氮、磷的吸收速率

氮磷比值对江蕨吸收氮的影响不显著 ($P > 0.05$), 即同一氮浓度不同氮磷比下江蕨吸收氮的速率没有明显的变化。各不同氮磷比值下江蕨对氮的吸收速率也是随氮浓度的升高而增大, 从氮浓度为 $5\mu\text{mol/L}$ 时的 $0.081 \sim 0.113\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 上升至氮浓度为 $30\mu\text{mol/L}$ 时的 $0.346 \sim 0.429\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ (图 3)。氮浓度与氮磷比没有显著的交互作用 ($P > 0.05$)。

氮磷比值和氮浓度对江蕨吸收磷的影响极显著 ($P < 0.01$), 且两者之间有显著的交互作用 ($P < 0.05$)。江蕨对磷的吸收速率随氮磷比值的增加有降低的趋势, 但在 $30\mu\text{mol/L}$ 的高氮浓度下, 氮磷比为 15 时的吸收速率反而明显高于氮磷比为 1 时的吸收速率 (图 4)。各氮磷比下江蕨对磷的吸收速率一般随氮浓度的升高而增大, 但在氮浓度为 $5\mu\text{mol/L}$ 和 $10\mu\text{mol/L}$ 、氮磷比为 100 和 150 时江蕨对磷的吸收速率为负值 (表 5)。方差分析见表 6。

随着环境氮磷比的增大, 江蕨吸收氮磷的比值也增大。当氮浓度为 $30\mu\text{mol/L}$, 氮磷比为 1 时的吸收比值仅为 6.5, 而同样的氮浓度下, 氮磷比为 150 时的吸收比值达到 49.7 (表 7)。

2.3 不同化合态氮比例下江蕨对氮、磷的吸收速率

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 占总无机氮比例不同时江蕨对 N、P 的吸收速率见表 8。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量最高的 D、F 两组 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 占总无机氮 63%) 江蕨对总氮和磷的吸收速率高于其余各组 ($P < 0.05$), 且两组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

江蕨对 3 种化合态氮的吸收比例见表 9。A 组培养液中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 所占比例相同, 但江蕨对 3 种氮的

表 4 不同磷浓度、温度下细基江蕨繁枝变种对磷吸收速率方差分析

Table 4 Analysis of variance between P uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different phosphorus concentration and different temperature

误差来源 Source of error	自由度 Degree of freedom	离差平方 和 Sum of the squared deviations	均方 Mean square	F 值 F value	P
温度 ^①	3	0.00125	0.00042	2.6	> 0.05
磷浓度 ^②	4	0.09605	0.02401	149.98	< 0.01
温度 \times 磷浓度 ^③	12	0.00465	0.00039	2.41	< 0.05
剩余 ^④	20	0.0032	0.00016		
总和 ^⑤	39	0.10513			

① temperature ② phosphorus concentration ③ temperature \times phosphorus concentration ④ residual ⑤ sum

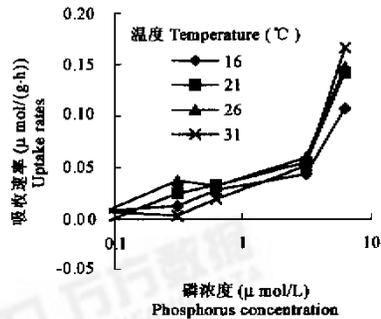


图 2 不同温度下细基江蕨繁枝变种对磷的吸收速率随磷浓度的变化

Fig. 2 The effects of temperature on P uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different phosphorus concentration

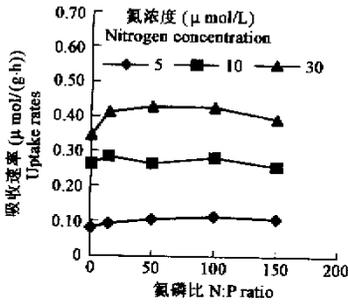


图 3 不同氮浓度下细基江蓠繁枝变种对氮的吸收速率随氮磷比的变化

Fig. 3 The effects of nitrogen concentration on N uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different N : P ratio in environment

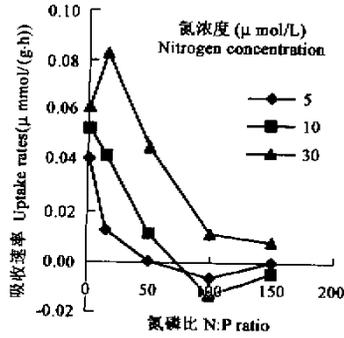


图 4 不同氮浓度下细基江蓠繁枝变种对磷的吸收速率随氮磷比的变化

Fig. 4 The effects of nitrogen concentration on P uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different N : P ratio in environment

吸收差异显著 ($P < 0.01$), 以 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 最高, 占总吸收氮的 40.7%; 对 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 的吸收差异不显著 ($P > 0.05$), 分别占总吸收氮的 28.5% 和 30.8%。在其他处理中, 江蓠对不同化合态氮的吸收速率及吸收比例随培养液中不同化合态氮的比例增加而增加。

表 5 不同氮磷比值下细基江蓠繁枝变种对磷吸收速率随氮浓度的变化 ($\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)

Table 5 The effects of N : P ratio in environment on P uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different nitrogen concentration

氮磷比值 N : P ratio	氮浓度 Nitrogen concentration ($\mu\text{mol}/\text{L}$)			
		5	10	30
1	均值 ^①	0.041	0.053	0.061
	标准差 ^②	0.0025	0.0154	0.0272
15	均值	0.013	0.042	0.083
	标准差	0.0033	0.0142	0.0219
50	均值	0.000	0.011	0.045
	标准差	0.0016	0.0106	0.0017
100	均值	-0.006	-0.013	0.011
	标准差	0.0061	0.0031	0.0037
150	均值	0.000	-0.005	0.008
	标准差	0.0011	0.0017	0.0035

① mean ② standard deviation

表 6 不同氮磷比值、氮浓度下细基江蓠繁枝变种对磷吸收速率方差分析

Table 6 Analysis of variance between N uptake rates of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different N : P ratio and different nitrogen concentration

误差来源 Source of error	自由度 Degree of freedom	离差平方和 Sum of the squared deviations	均方 Mean square	F 值 F value	P
氮磷比值 ^②	4	0.01497	0.00374	30.03	<0.01
氮浓度 × 氮	8	0.00277	0.00035	2.78	<0.05
磷比值 ^③	15	0.00187	0.00012		
剩余 ^④	29	0.0252			
总和 ^⑤					

①nitrogen concentration ② N : P ratio ③nitrogen concentration × N : P ratio ④residual ⑤sum

3 讨论

3.1 不同氮、磷浓度和温度下细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收

本实验的结果显示, 细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收速率随营养盐浓度的升高而增加。这是因为环境中氮磷浓度的上升使藻体利用氮、磷的一系列生理过程的底物浓度升高, 因而在一定范围内其同化作用增加。如江蓠属的两个种 *Gracilaria verrucosa* 和 *G. tikvahiae* 在营养盐浓度较高的情况下, 光合速率增加^[8]。温度也影响藻类的光合作用及生长等生理活动, 从而影响到藻类对营养盐的吸收。

当温度从 16°C 升到 22°C 时, 海带 *Laminaria saccharina* 的最大光合速率明显下降^[9]。海带、裙带菜、紫菜、石花菜、江蓠与麒麟菜的生长发育都不同程度受到温度的控制^[10]。在本实验所设的温度下, 细基江蓠

表 7 不同环境氮磷比值及氮浓度下细基江蓠繁枝变种吸收的氮磷比值

Table 7 The N : P ratio of nutrient uptaken by *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different N : P ratio and nitrogen concentration in environment

氮浓度($\mu\text{mol/L}$) Nitrogen concentration	环境氮磷比 N : P ratio in environment				
	1	15	50	100	150
5	2	7.4	—	—	—
10	5.1	6.8	45.4	—	—
30	6.5	5.1	9.5	40.6	49.7

— 磷的吸收速率出现负值

整体上不受温度影响,但在高磷浓度组也有温度效应(表 3)。

表 8 不同化合态氮的比例下细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收速率($\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)

Table 8 The uptake rates of nitrogen and phosphorus of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* under different ratio in chemical form of nitrogen

营养盐 Nutrient	A	B	C	D	E	F	G
NO ₃ -N	0.079	0.161	0.157	0.077	0.073	0.019	0.018
	± 0.014	± 0.007	± 0.008	± 0.011	± 0.012	± 0.002	± 0.003
NH ₄ -N	0.114	0.090	0.024	0.202	0.021	0.211	0.087
	± 0.011	± 0.004	± 0.004	± 0.009	± 0.003	± 0.003	± 0.003
NO ₂ -N	0.086	0.020	0.081	0.019	0.157	0.080	0.178
	± 0.012	± 0.001	± 0.010	± 0.012	± 0.004	± 0.006	± 0.018
DIN	0.279	0.271	0.262	0.298	0.251	0.310	0.284
	± 0.005	± 0.009	± 0.004	± 0.009	± 0.014	± 0.001	± 0.018
PO ₄ -P	0.033	0.027	0.027	0.044	0.031	0.040	0.030
	± 0.007	± 0.005	± 0.003	± 0.008	± 0.003	± 0.002	± 0.009

表 9 培养液中 3 种化合态氮的比例(%总氮)及细基江蓠繁枝变种对其吸收比例(%被吸收氮)

Table 9 The ratios of three forms of nitrogen in culture solution(%DIN) and those uptaken by algae(%uptaken DIN)

No.		NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N
A	培养液 ^①	33	33	33
	吸收比 ^②	28.5	40.7	30.8
B	培养液	63	31	6
	吸收比	59.3	33.2	7.5
C	培养液	63	6	31
	吸收比	59.7	9.3	31
D	培养液	31	63	6
	吸收比	26	67.8	6.2
E	培养液	31	6	62.7
	吸收比	29.1	8.2	62.7
F	培养液	6	63	31
	吸收比	6.1	68.1	25.8
G	培养液	6	31	63
	吸收比	6.2	30.9	62.9

① ratio in culture solution ②uptake ratio

万方数据

繁枝变种对磷的吸收速率无显著性影响,这是否说明该温度范围内,细基江蓠繁枝变种与磷吸收相关的酶或化学反应不受温度的影响,尚待进一步探讨。细基江蓠繁枝变种对氮的吸收速率随温度的不同而异,总体上以 21℃、26℃时有较高的吸收速率,此结果与这种红藻的生长适宜条件相对应^[4,11]。本实验中另一个重要的结果是温度与营养盐浓度具有显著的交互作用。细基江蓠繁枝变种对氮的吸收速率随温度变化的趋势因氮浓度不同而有差异,高氮浓度下,变化明显,而在氮浓度较低情况下,吸收速率随温度变化趋势则不明显(表 1);对磷的吸收速率在

细基江蓠繁枝变种属多年生种类,对温度、盐度适应范围广^[11]。就氮的吸收速率而言,当环境中氮浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$,温度为 21℃时,细基江蓠繁枝变种对氮的吸收速率为 2.58 $\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{gFW})$,高于相似条件下的 *Gracilaria chilensis*、*G. foliifera*、*G. tikvahiae* 等经济海藻对氮的吸收速率^[12]。在亚热带地区河口、近海的水温一般在 16~32℃之间,氮、磷浓度分别在 100 $\mu\text{mol/L}$ 、2.4 $\mu\text{mol/L}$ 以内;虾蟹养殖池的水温全年平均在 24.7℃,氮、磷浓度分别在 20~43 $\mu\text{mol/L}$ 、0.05~1.56 $\mu\text{mol/L}$ 之间。这种条件下细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收速率随着营养盐含量的升高而升高,因此能动态调节营养盐水平使其限制在一定的范围内。

3.2 不同氮磷比及氮浓度下细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收

本实验结果表明,当氮浓度一定时,氮磷比对细基江蓠繁枝变种吸收氮的吸收速率影响不显著,而氮磷比对磷的吸收速率有极显著的影响。这是因为

当氮浓度一定时氮磷比的变化代表磷的浓度变化,即氮磷比越大,磷的浓度就越低,细基江蓠繁枝变种对磷的吸收速率就越小。所以对磷的吸收速率产生影响的实际是磷的浓度及氮磷比。本实验中,在氮浓度为 5 和 $10\mu\text{mol/L}$ 时都以 $\text{N}:\text{P}$ 为 1 时对磷的吸收速率最高,但当氮浓度高达 $30\mu\text{mol/L}$ 时,氮磷比为 1 时的磷吸收速率反而低于氮磷比为 15 时的吸收速率。可能此时磷浓度过高反而抑制藻对磷的吸收。另外,在氮浓度为 $5\mu\text{mol/L}$ 和 $10\mu\text{mol/L}$ 、氮磷比为 100 和 150 时细基江蓠繁枝变种对磷的吸收速率出现负值,这可能由于培养液中磷的浓度过低,已接近实验所采用的测定方法的检出下限($0.03\mu\text{mol/L}$)所致。

藻类对氮、磷的吸收比例与多种因素有联系。细胞利用氮、磷的比例与藻吸收的氮磷比有密切的关系。大型藻类同化氮、磷的比例为 $\text{N}:\text{P}=30:1$ ^[12]。而本实验结果显示,细基江蓠繁枝变种吸收氮磷的比值并非固定在 $30:1$,而是在其上下作较大幅度的波动,并受到环境中 $\text{N}:\text{P}$ 的影响。低磷环境中,对磷的吸收速率下降甚至出现负值。此外,环境出现磷剩余时,细基江蓠繁枝变种对氮的吸收相对降低。中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 在磷限制时,细胞内有机磷水解成无机磷的量增加,并对氮吸收加强,当磷剩余时藻细胞叶绿素及碳水化合物含量下降^[13],这种机制是否可用于细基江蓠繁枝变种则尚待探讨。细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收比例可低于大型藻类对氮、磷的同化比例 ($30:1$)。这是否与细基江蓠繁枝变种贮存氮的作用有关尚待探讨,而有些江蓠种类会以磷酸核酮糖羧化酶/氧化酶 (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) 作为氮贮存库^[14]。从表 7 可看出,环境 $\text{N}:\text{P}$ 比值为 1、15 时,吸收的 $\text{N}:\text{P}$ 在 5~9 之间,由此可推断,环境 $\text{N}:\text{P}$ 值为 1~15 时,吸收的 $\text{N}:\text{P}$ 比值与环境 $\text{N}:\text{P}$ 比值比较相近,但这是否就是该藻生长及体内利用氮、磷的最佳环境 $\text{N}:\text{P}$ 则有待进一步确定。当然,环境的 $\text{N}:\text{P}$ 比值与藻类对氮、磷吸收速率的关系还会受到光照、温度等重要的物化条件的影响,并涉及到藻体本身的营养贮存状况以及藻类对不同种类营养盐的选择吸收等因素。

在富营养化海区和水产动物养殖场附近的海水营养盐浓度较高, $\text{N}:\text{P}$ 值则变化在 1~160 之间。细基江蓠繁枝变种在这种条件下可有效吸收氮和磷,特别是对氮的吸收速率更高,几乎不受环境氮磷比值变化的影响。但养殖区海水中溶解态的磷含量经常相对较低, $\text{N}:\text{P}$ 比值往往大于 30。因此,往养殖池或养殖海区投放细基江蓠繁枝变种以吸收氮、磷等营养盐时,长期的高 $\text{N}:\text{P}$ 环境是否会造成藻体的磷缺乏,这一点值得进一步研究。

3.3 不同化合态氮比例下细基江蓠繁枝变种对氮、磷的吸收

本实验中,3 种化合态氮所占比例相同时,藻体对 NH_4^+ (NH_3) 的吸收速率稍大于 NO_3^- 、 NO_2^- 。因此本实验中 NH_4^+ (NH_3)-N 含量最高 (63%) 的两组 (D、F),其对总氮的吸收速率也大于其余各组。藻类优先吸收 NH_4^+ (NH_3),据认为是因藻类细胞缺少硝酸还原酶,所以先吸收 NH_4^+ (NH_3),待环境中 NH_4^+ (NH_3) 的浓度降低到一定程度时才吸收 NO_3^- ^[15]。但事实上,硝酸还原酶在细菌、藻类、真菌、高等植物都有检出,并且有学者认为 NO_3^- 是自养生物最重要的氮源,只有当 NO_3^- 供应不足时,植物才转而吸收 NH_4^+ (NH_3)^[16]。上述观点的不同似乎是由于实验材料的不同所造成。藻类将吸收的无机氮同化为生物体的有机氮时,都必须还原成 NH_3 的形态^[16~18]。但这是否与细基江蓠繁枝变种优先吸收 NH_4^+ (NH_3) 的选择有关尚不清楚。已有研究证实大型藻类对不同化合态氮的吸收与其在总氮中所占的比例有关。Ng 等^[19]研究大型藻类 *Elodea densa* 净化养殖污水时,发现 *Elodea densa* 对 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_3 -N 的清除率与 3 种化合态氮占总氮的比例大小成正比。平田一郎^[20]报道石莼 *Ulva pertusa* 对养殖水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_3 -N 的清除率也显示同样的结果,这些都与本实验结果相一致。

海水中不同化合态的氮在微生物作用下可以相互转化。硝酸盐是含氮化合物的最终氧化产物,通常情况下,在海水无机氮中占有较大比例,主要来源于生命代谢物质的分解、氧化及陆源径流补给。亚硝酸盐是含氮化合物氧化还原过程的中间产物,当亚硝酸盐的浓度过高或变化过剧往往表明海洋生态环境的恶化^[1]。氨态氮是一种还原态的无机氮,当水体缺氧时,有利于硝酸盐与亚硝酸盐还原为氨态氮。水生动物的排泄物以氨为主,生物残体的分解及动物分泌、排出的其他有机物在细菌的作用下也会产生氨,故水产养殖场及沿岸**水质数据**区内氨氮含量较高。细基江蓠繁枝变种对 3 种氮都能吸收,并对各种氮的吸收速率随其浓度的上升而增大,显示它有调控营养盐水平防止成分剧变的能力。另外,该藻对氮优先吸收的作用

使其成为调控养殖海区富营养化或者作为处理高氨氮含量的养殖污水时较为理想的藻种。

3.4 结语

防治海水富营养化必须考虑水中营养盐因子的复杂变化,本文主要研究了营养盐浓度、氮磷比值及不同化合态氮等因子对细基江蓠繁枝变种吸收氮磷的影响。结果表明,细基江蓠繁枝变种对氮磷去除能力较强,对3种无机氮都能吸收,显示其在水区富营养化的生物防治中具有应用潜力。

参考文献

- [1] State Ocean Administration(国家海洋局). *Specifications of Oceanographic Survey*(in Chinese). Beijing: Ocean Press, 1991, 265~273.
- [2] Boyd, C. E., Clay J W. Shrimp farming and the environment. *Scientific American*(in Chinese)(科学), 1998, **9**:15~23.
- [3] Ji W D(暨卫东). Relationship of biogeochemistry from organic pollution and eutrophication in the Maluan Bay of Xiamen. *Acta Oceanologica Sinica*(in Chinese)(海洋学报), 1998, **20**(1):134~143.
- [4] Liu S Y(刘思俭). *The Culture of Gracilaria*(in Chinese). Beijing: Agricultural Press. 1988.
- [5] Fan X(范晓), Han L J(韩丽君), Zhou T C(周天成), et al. Chemical composition of economic sea weeds from the coast of China. *Ocean et Limnol Sin*(in Chinese)(海洋与湖沼), 1995, **26**(2):199~207.
- [6] Grasshoff K. *Methods of seawater analysis*(in Chinese). Beijing: Science Press. 1982, 86~103.
- [7] Ji S D(金送笛), Li Y H(李永涵), Ni C H(倪彩虹), et al. Uptake by *Potamogeton crispus* of nitrogen and phosphorus from water and some affecting factors. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1994, **14**(2):168~173.
- [8] Dawes C J, Koch E W, et al. Physiological responses of the red algae *Gracilaria verrucosa* and *G. tikvahiae* before and after nutrient enrichment. *Bull. Mar. Sci.*, 1990, **46**(2):335~344.
- [9] Gerard V A. The role of nitrogen in high-temperature tolerance of the kelp, *Laminaria saccharin*(Chromophta). *J. Phycol.*, 1997, **33**(5):800~810.
- [10] Zhen C K(曾呈奎), Wang S J(王素娟), Liu S J(刘思俭), et al. *The culture of sea algae*(in Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 1985.
- [11] Wu C Y(吴超元), Li R Z(李幼芷), Lin G H(林光恒), et al. Study on the optimum environmental parameters for the growth of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* in pond culture. *Ocean et Limnol Sin*(in Chinese)(海洋与湖沼), 1994, **25**(1):60~66.
- [12] Gao K, Mckinley K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation: a review. *J. Appl. Phycol.*, 1994, **1**:45~60.
- [13] Li T(李铁), Hu L G(胡立国), Shi Z L(史致丽). Effects of nutrients on the growth and the composition of nitrogen and phosphorus of *Skeletonema costatum* and *Nitzschia cloatieri*um. *Ocean et Limnol Sin*(in Chinese)(海洋与湖沼), 2000, **31**(3): 239~245.
- [14] Ekman P, Lignell A, Pedersen M. Localization of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in *Gracilaria secundata*(Rhodophyta) and its role as a nitrogen storage pool. *Bot. Mar.*, 1989, **32**(6):527~534.
- [15] Yan G A(严国安), Tan Z Q(谭智群). Research progresses on algae used in sewage purification. *Advances in Environmental Science*(in Chinese)(环境科学进展), 1995, **3**(3):45~54.
- [16] Richter G. *Plant metabolism*(in Chinese). Beijing: Science Press. 1985, 301~314.
- [17] Pan R C(潘瑞炽), Dong Y D(董愚得). *Plant Physiology*(in Chinese). Beijing: Higher Education Press. 1995, 74~77.
- [18] Mengel K, Kirkby E A. *Principles of plant nutrition*(in Chinese). Beijing: Agriculture Press. 1987, 171~186.
- [19] Ng W J, Sim T S, Ong S L, et al. The effect of *Elodea densa* on aquaculture water quality. *Aquaculture*, 1990, **84**:267~276.
- [20] Hirada 万方数据. Ecological effects of *Ulva pertusa* in recirculation culture system of the prawn *Penaeus japonicus*. *Suisanzoshoku*, 1990, **39**(2):195~200.